

К. т. н. В. А. НИКИТИНСКИЙ, к. т. н. Б. И. ЖУРАВЛЕВ

Украина, г. Рубежное, РФ Восточнoукраинского национального университета им. Владимира Даля  
E-mail: contact@rfvnu.lg.ua

Дата поступления в редакцию  
27.02 2006 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. Н. ПЕТЛИЦКИЙ  
(НПО "Интеграл", г. Минск)

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ИОНОВ НА ОСНОВЕ КОНТРАГИРОВАННЫХ РАЗРЯДОВ

*Обеспечивается создание ускоренных пучков ионов с токами до 0,6 А и энергиями до 5 кэВ с равномерным распределением плотности тока ионов в поперечном сечении пучков площадью от  $10^{-4}$  до 0,2 м<sup>2</sup>.*

Уникальные возможности ионно-лучевых технологий в вакууме стимулируют работы по созданию и усовершенствованию оборудования для этих целей. Наиболее ответственным звеном такого оборудования являются источники ионов, обеспечивающие ускоренные до требуемых энергий потоки ионов заданного поперечного сечения с равномерным распределением плотности тока по сечению.

Выходные параметры источника ионов определяются типом разряда, генерирующего плазму, из которой производится отбор ионов. Для повышения эффективности генерации заряженных частиц в плазмотронах применяется контрагирование разряда отверстием в промежуточном электроде, что позволяет разделить область интенсивной генерации плазмы с более высоким давлением и область формирования эмиссионной границы с низким давлением. Двойной электрический слой (ДЭС), образующийся с катодной стороны контрагирования разряда между плотной анодной и редкой катодной плазмами (рис. 1), создает ускоренные в противоположные стороны потоки электронов и ионов.

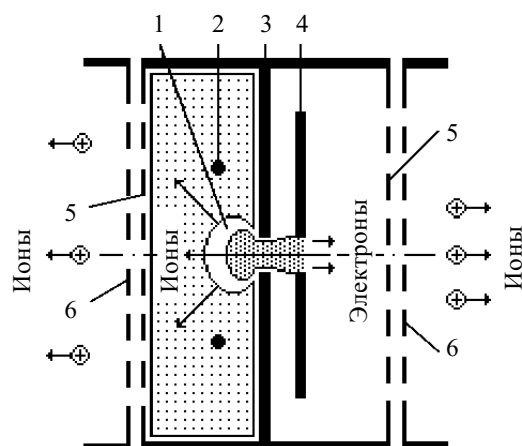


Рис. 1. Сравнение отбора ионов с катодной и анодной сторон контрагированного разряда:

1 — ДЭС; 2 — термокатод; 3 — промежуточный электрод; 4 — анод; 5 и 6 — система извлечения

В плазмотронах Арденне [1] используется амби-полярная диффузия ионов в направлении ускоренного потока электронов, и отбор ионов производится с анодной стороны ДЭС. До настоящего времени параметры высоковольтных пучков ионов, формируемых в дуоплазмотронах Арденне через одно эмиссионное отверстие, являются уникальными. Для технологических источников ионных пучков большой площади поперечного сечения требуемая энергия не превышает 5 кэВ, и для получения интенсивных пучков ионов используются многоапертурные системы извлечения ионов, образованные эмиссионным 5 и ускоряющим 6 электродами (см. рис. 1).

Фокусировка электронов двойным электрическим слоем в направлении контрагирования разряда является недостатком, т. к. приводит к большой неравномерности распределения плотности плазмы по радиусу и, соответственно, по обрабатываемой поверхности. Целесообразно использовать расфокусированный в ДЭС поток ионов при их отборе и формировании в пучок с катодной стороны контрагирования разряда.

Целью настоящей работы является оптимизация разрядной камеры с использованием специфических особенностей ДЭС.

Сравнение эффективности отбора ионов с катодной и анодной сторон при геометрическом контрагировании разряда (рис. 1) показало, что она примерно одинакова [2]. Напуск рабочего газа (аргона) в обоих случаях производился со стороны, противоположной отбору ионов. Введение магнитного поля с радиальной составляющей относительно оси контрагирования увеличивает напряжение дугового разряда и приводит к увеличению на порядок тока эмиссии ионов в обоих случаях.

При отборе ионов с катодной стороны контрагирования разряда введение со стороны анода ферромагнитного стержня 2 (см. рис. 2) в контрагирующее отверстие приводит к образованию кольцевой контрагирующей щели. При этом индукцию магнитного поля в области контрагирования можно уменьшить на порядок по сравнению с дуоплазмотронами до величин  $\approx 0,1$  Тл и увеличить напряжение на разряде  $U_p$  до величин порядка 100 В, а также увеличить ток эмиссии ионов в несколько раз [3, 4]. Увеличение индукции магнитного поля более 0,2 Тл (до 0,4 Тл), а также подбор геометрии щели (ширина 2 мм при среднем диаметре 12 мм) и катодной полости (диа-

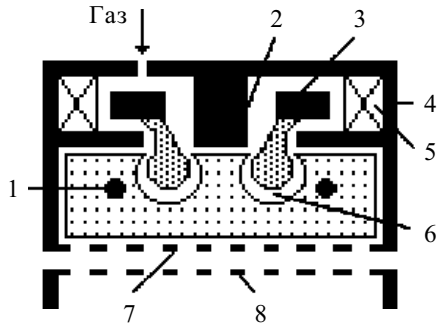


Рис. 2. Схема источника ионов на основе разряда в скрещенных полях:

1 — термокатод; 2 — стержень; 3 — анод; 4 — промежуточный электрод; 5 — катушка; 6 — ДЭС; 7 и 8 — система извлечения

метр более 80 мм, высота более 50 мм) позволили исключить термокатод (схема источника на рис. 2, но термокатод 1 отсутствует, а промежуточный электрод находится под потенциалом катода). Разряд реализован с холодным полым катодом за счет двухкаскадного последовательного объемного размножения электронов [5—8] при разрядном токе  $I_p \approx 1$  А и напряжении  $U_p \approx 300$  В.

Реализован и исследован пучково-плазменный разряд (ППР), контрагированный отверстием в холодном полом катоде, при  $I_p \approx 1$  А и напряжении  $U_p \approx 400$  В (рис. 3) [9, 10]. В этом разряде также имеет место двухкаскадное последовательное объемное размножение электронов.

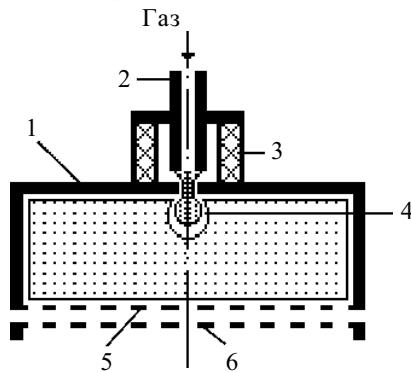


Рис. 3. Схема источника ионов на основе ППР:

1 — катод; 2 — анод; 3 — изолятор; 4 — ДЭС; 5 и 6 — система извлечения

Параллельно с источниками ионов разрабатывались сварочные электронные пушки на основе дугового контрагированного разряда с холодным магниевым катодом [11] и горячим самонакаливающимся капиллярным полым катодом с  $LaV_6$  [12, 13]. Отбор электронов производился с анодной стороны контрагирования разряда.

С учетом накопленного опыта экспериментальных и теоретических исследований разрядов была разработана базовая конструкция разрядной камеры для получения интенсивных пучков ионов и электронов большого поперечного сечения различной формы (круг, прямоугольник, эллипс [14]).

Разделение разряда на три части [15], сообщаемые между собой через контрагирующие отверстия в промежуточном электроде (рис. 4), с напуском газа

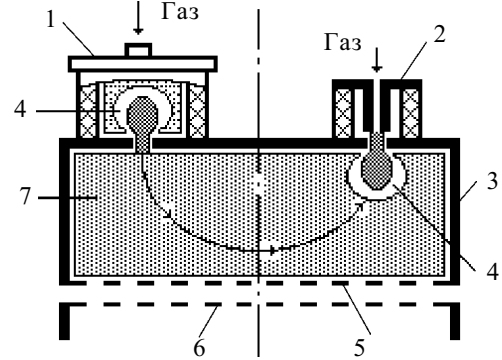


Рис. 4. Схема источника ионов с разворотом разряда на 180°:

1 — катод; 2 — анод; 3 — промежуточный электрод; 4 — ДЭС; 5 и 6 — система извлечения; 7 — синтезированная плазма

в герметизированную камеру с катодом 1 и в другую герметизированную камеру с анодом 2 позволяет поддерживать разряд через вакуумный объем, ограниченный промежуточным электродом, при давлениях порядка  $6,7 \cdot 10^{-3}$  Па ( $\approx 5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.). Это стало возможным благодаря созданию синтезированной плазмы 7 из ускоренных двойными электрическими слоями потоков электронов из катодной и ионов — из анодной камер, что позволяет при том же разрядном токе удвоить ток эмиссии ионов. При размещении катодной и анодной камер с одной стороны, противоположной общему многоапертурному эмиссионному электроду 3, возможно обеспечение пучков произвольной формы поперечного сечения с равномерным распределением плотности тока ионов по сечению за счет увеличения числа анодных камер.

На рис. 5 схематически представлена конструкция источника ионов на основе дугового контрагированного разряда [15, 16]. Разрядная камера включает катодный и анодный узлы, расположенные по одну сторону от промежуточного электрода, что облегчает охлаждение электродов и подключение их к источнику питания.

Основным узлом, определяющим работоспособность источника ионов, является катодный. Сравнение двух катодов — горячего молибденового катода с капиллярным каналом диаметром 0,2 мм, внешним диаметром 3 мм и внутренней полостью диаметром 2 мм с расположенной в ней крошкой из гексаборида лантана и холодного магниевый катода с пленкой окиси на его поверхности — показало, что для разборных технологических вакуумных установок магниевый катод проще в изготовлении, дешевле и удобнее в эксплуатации. Катодный узел (электроды 7, 8) с магниевым катодом 6 закреплен в держателе катода 5. Тонкая пленка окиси на поверхности магниевый катода способствует инициированию катодного пятна на при ее пробое.

Работа катода на инертном газе (аргон) за несколько десятков минут приводит к очистке катода от пленки окиси, и дуга гаснет. Для регенерации пленки окиси магния в режиме постоянного дугового разряда в катодный узел подается смесь аргона с кислородом в соотношении 9:1. Увеличение процентного содержания кислорода приводит к возникновению на рабочей поверхности катода толстых окисных образо-

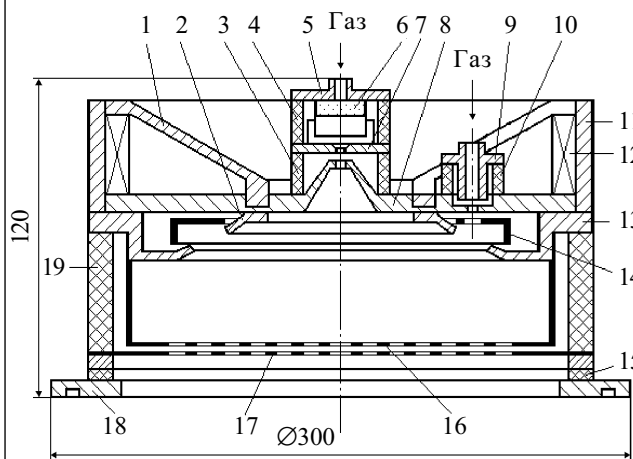


Рис. 5. Конструкция источника ионов:

1, 11 — магнитоводы; 2, 13 — полюса электромагнита; 3, 4, 10, 15, 19 — изоляторы; 5 — держатель катода; 6 — катод; 7 — поджигающий электрод; 8 — промежуточный электрод; 9 — аноды; 12 — катушка; 14 — анодное кольцо; 16 — эмиссионный электрод; 17 — ускоряющий электрод; 18 — фланец

ваний и кратеров, что в свою очередь вызывает нестабильность тока дуги и разрушение катода в виде отдельных макрочастиц. Практическая подготовка смеси газов в устройстве осуществлялась с помощью калиброванной течи из пористого никеля, которая сообщалась с атмосферой или кислородным баллоном.

Низкий стартовый ток самостоятельной дуги (порядка 1 А), такой же по величине, как и в случае с горячим капиллярным катодом, реализуется на холодном катоде только на магнии, что, вероятно, обусловлено небольшой разницей между температурами плавления и кипения магния.

Катодный узел автономно обеспечивает поток электронов в вакуум с током от 1 до 10 А с энергией порядка 20 эВ следующим образом.

После подачи рабочего вещества и напряжения от блока питания разряда сначала зажигается самостоятельный дуговой разряд с катодным пятном между катодом 6 и поджигающим электродом 7. Из-за ограничения тока балластным сопротивлением в цепи электрода 7 разряд через контрагирующее отверстие диаметром 1,5 мм в этом электроде перебрасывается на электрод 8. Электрический слой, образующийся с катодной стороны контрагирующего отверстия, ускоряет и фокусирует электроны в выходное отверстие в электроде 8. Фиксация анодной части дуги контрагирующим отверстием обеспечивает постоянство потока электронов в вакуум независимо от положения катодного пятна [17].

Для генерации направленных в вакуум потоков ионов в промежуточном электроде 8 имеется несколько контрагирующих отверстий, и против них соосно устанавливаются анодные узлы, включающие аноды 9 и изоляторы 10. Ограничение тока в цепи промежуточного электрода балластным сопротивлением перебрасывает разряд на аноды 9. Против анодов образуются сгустки плазмы диаметром порядка 10 мм, отделенные от синтезированной в вакууме плазмы электрическими слоями. Генерация частиц в сгуст-

ках обусловлена пучково-плазменным взаимодействием электронов, ускоренных в слое [9]. Ионы, ускоренные в слоях до энергий порядка 10 эВ, поступают в вакуум расходящимися потоками. Из катодного узла через выходное отверстие в вакуум также поступают ионы вслед за электронами за счет амбиполярной диффузии.

Расположение анодов 9 вокруг катодного узла и их число определяются технологическими условиями. Для получения равномерной плотности потока против катодного узла в вакууме ставится специальный экран (на рисунке не показан).

Для повышения степени ионизации атомов и энергии ионов, ускоренных электрическими слоями из плотной плазмы у анодов, вводится радиальное магнитное поле с помощью ферромагнитных полюсов 2 и 13, катушки 12 и магнитопроводов 1 и 11, а электрод 8 выполняется из немагнитного металла. Кольцо 14, имеющее потенциал анодов, служит для организации замкнутого дрейфа электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Расположение между разрядом и обрабатываемыми изделиями многоапертурной системы извлечения (эмиссионный 16 и ускоряющий 17 электроды) позволяет формировать потоки ионов или электронов с большим поперечным сечением и энергиями в несколько килоэлектронвольт [16].

После зажигания разряда в камере у эмиссионного электрода образуется синтезированная плазма, из которой при подаче напряжения между ускоряющим 17 и эмиссионным 16 электродами производится отбор соответствующего типа частиц (ионов или электронов) и формирование их в пучок. Данный источник позволяет получать пучки ионов любых газов, включая кислород, пары ацетона. При использовании плоской системы извлечения (электроды 16 и 17) получены пучки ионов аргона с токами  $I_{п}$  до 0,6 А при ускоряющих напряжениях от 0,5 до 5 кВ с неравномерностью распределения плотности тока ионов до 10% в поперечных круглом или прямоугольном се-

Тип источника ионов	Назначение	$I_{п}$ , А	$S_{п}$ , см <sup>2</sup>
Разряд с горячим катодом			
На основе разряда с вольфрамовым катодом [4]	Ионно-лучевое травление фотошаблонов и пленок субмикронных	0,3	80
На основе разряда с капиллярным катодом с LaB <sub>6</sub> [12]	интегральных микросхем, очистка подложек перед напылением пленок	0,2	200
Разряд с холодным катодом			
На основе разряда, контрагированного в скрещенных полях [8]	Дополнительно к перечисленному выше: ионно-лучевое травление	0,15	80
На основе пучково-плазменного разряда [10]	фоторезистов фотошаблонов, подгонка сопротивлений	0,05	80
На основе разряда с магниевым катодом с четырьмя анодами [15]:	пленочных резисторов, доокисление оптических покрытий, корректировка состава сверхпроводящих пленок пучком ионов кислорода, точная доводка поверхностей	0,2	400
— без магнитного поля;			
— с магнитным полем		0,6	до 2000

чениях пучков площадью  $S_{\text{п}} 0,04 \text{ м}^2$ . Площадь поперечного сечения пучка уменьшалась до  $10^{-4} \text{ м}^2$  при использовании вогнутой в сторону разряда сферической системы извлечения и размещении обрабатываемого изделия вблизи центра сферы [14]. Площадь поперечного сечения пучка увеличивалась до  $0,2 \text{ м}^2$  при изменении вогнутости системы извлечения на противоположную и размещении обрабатываемого изделия на расстоянии порядка  $0,6 \text{ м}$  от устройства.

Был разработан внутривакуумный вариант источника ионов без принудительного охлаждения с капиллярным самонакаливающимся катодом с крошкой  $\text{LaV}_6$ . Нейтрализация заряда ионов в пучке обеспечивается без использования термокатаода [18].

В таблице приведены конкретные технологические процессы, для которых разрабатывались рассмотренные в статье источники ионов, и некоторые выходные параметры этих источников.

### Заключение

В разработанных источниках ионов для обработки в вакууме больших поверхностей максимально использованы специфические особенности двойного электрического слоя, а именно, реализованы ускоренные в ДЭС потоки как электронов, так и ионов, в вакуум в сторону многоапертурного эмиссионного электрода. Получена возможность формировать пучки произвольного сечения за счет соответствующего расположения анодов на промежуточном электроде, уменьшена на порядок напряженность магнитного поля, необходимая для повышения в несколько раз напряжения ДЭС.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ardenne M. Tabellen der electronenphysik, ionenphysik und übermicroscopie.— Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1956.
2. Никитинский В. А., Захаров А. С., Ковалев В. В. Два способа извлечения ионов из контрагированного разряда // Тр. Новочеркасского политехнического ин-та.— 1976.— Т. 324.— С. 78—90.
3. Никитинский В. А., Захаров А. С. Выход ионов в вакуум из разряда, контрагированного в скрещенных электрическом и магнитном полях // Журнал технической физики.— 1974.— Т. 44, № 6.— С. 1333—1334.

4. Журавлев Б. И., Никитинский В. А., Захаров А. С. Источник ионов на основе разряда, контрагированного в скрещенных полях // Приборы и техника эксперимента.— 1977.— № 4.— С. 204—206.

5. Никитинский В. А., Журавлев Б. И. Разряд, контрагированный в скрещенных полях, с холодным полым катодом // Журнал технической физики.— 1980.— Т. 50, № 2.— С. 440—441.

6. Никитинский В. А., Журавлев Б. И. Условия существования разряда с холодным катодом, контрагированного в скрещенных полях // Там же.— 1982.— Т. 52, № 5.— С. 880—883.

7. Никитинский В. А., Журавлев Б. И., Гапоненко А. Т. Двухкаскадный самостоятельный разряд низкого давления // Там же.— 1985.— Т. 55, № 8.— С. 1637—1639.

8. Журавлев Б. И., Никитинский В. А., Гапоненко А. Т. Газоразрядный источник ионов с холодным катодом // Приборы и техника эксперимента.— 1985.— № 4.— С. 157—158.

9. Стогний А. И., Никитинский В. А., Журавлев Б. И. Двухкаскадный самостоятельный разряд низкого давления без магнитного поля // Журнал технической физики.— 1988.— Т. 58, № 5.— С. 993—995.

10. Журавлев Б. И., Прилепский В. В., Горлатов В. С. Технологический источник ионов // Приборы и техника эксперимента.— 1993.— № 3.— С. 215—218.

11. Лозовой Б. С., Каплан А. А., Никитинский В. А. и др. Геометрия проплавления сварного шва с помощью плазменного источника электронов // Сварочное производство.— 1980.— № 5.— С. 19—20.

12. Пат. 1568793 России. Источник заряженных частиц / В. А. Никитинский, С. И. Обьедков, А. И. Стогний, О. А. Богатырев.— 1995.— Б. И. № 9.

13. Никитинский В. А., Богатырев О. А. Высоковольтный разряд с катодным пятном при постоянном напряжении на электродах // Письма в Журнал технической физики.— 1988.— Т. 54, № 4.— С. 347—349.

14. Пат. 1210607 России. Устройство для ионно-лучевой обработки / М. А. Фурман, В. А. Никитинский, Б. И. Журавлев и др.— 1995.— Б. И. № 8.

15. Пат. 1616412 России. Источник заряженных частиц / В. А. Никитинский, О. А. Богатырев, С. И. Обьедков.— 1995.— Б. И. № 10.

16. Никитинский В. А., Гапоненко А. Т., Обьедков С. И. Источники ионов непрерывного действия // Приборы и техника эксперимента.— 1992.— № 4.— С. 244.

17. Nikitinsky V. A., Kreindel Yu. E. The constricted discharge of low pressure with the cathode spot in magnetic field // 10th Intern. Conf. Phenomena Ioniz. Gases.— Oxford.— 1971.— P. 217.

18. Журавлев Б. И., Никитинский В. А., Гапоненко А. Т. Компенсация заряда пучка ионов без использования термокатаода // Журнал технической физики.— 1987.— Т. 57, № 9.— С. 1826—1828.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Взаимовлияние объектов малых размеров в микросхеме. (Россия, г. Санкт-Петербург)
- Свойства легированных углеродных (алмазоподобных) пленок. (Украина, г. Одесса)
- Измеритель мощности ультрафиолетового излучения в диапазонах УФ-А, УФ-В, УФ-С и их комбинаций. (Украина, г. Киев)
- Повышение надежности изделий электронной техники на стадии производства. (Молдова, г. Кишинев)
- Исследование возможностей дистанционного неразрушающего тепловизионного контроля состояния взлетно-посадочных полос в аэропортах. (Украина, г. Киев)
- Опыт применения европейского стандарта PSS-49 при разработке низкотемпературных тепловых труб для пассивной системы теплового контроля микроспутника BIRD. (Украина, г. Киев)
- Экспериментальное исследование температурного поля радиатора кулера. (Украина, г. Киев)
- Тестер терапевта. (Россия, г. Таганрог)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

